

ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ И МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.822.17

DOI: 10.18324/2077-5415-2026-1-7-15

Влияние нелинейных факторов на триботехнические параметры подшипников скольжения с полимерными покрытиями

Е.А. Болгова^a, В.А. Кохановский^b, М.А. Мукутадзе^c

Ростовский государственный университет путей сообщения, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2, Ростов-на-Дону, Россия

^a bolgova_katya6@mail.ru, ^b vcohan@yandex.ru, ^c murman1963@yandex.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-0737-1846>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-7973-9833>,

^c <https://orcid.org/0000-0003-2810-3047>

Статья поступила 18.12.2025, принята 03.02.2026

В статье рассматривается влияние нелинейных факторов на триботехнические характеристики радиальных подшипников скольжения с антифрикционными полимерными покрытиями. Основное внимание уделено разработке и обоснованию математической модели, описывающей движение вязкой смазочной среды в зазоре между валом с покрытием и опорной поверхностью подшипника с учётом геометрических особенностей покрытия (в частности, наличия осевой канавки) и реологических свойств смазки. Основным вкладом работы является разработка новой математической модели, предназначенной для проектирования радиальных подшипников. Эта методика опирается на систему нелинейных уравнений, описывающих движение истинно вязкого смазочного материала, и учитывает его реологические характеристики, а также требования уравнения неразрывности. В результате были сформулированы новые математические модели, которые позволяют количественно оценить влияние числа Рейнольдса на процессы, происходящие в смазочном слое подшипника. Верификация модели проведена на основе экспериментальных данных, полученных при испытаниях металлополимерных подшипников на модернизированной машине трения. Анализ экспериментальных и расчётных данных показал расхождение не более 5 %, что подтверждает достоверность модели. Полученные результаты позволяют повысить точность расчётов несущей способности и коэффициента трения на 7–15 % и 5–13 % соответственно. Работа обладает как научной новизной, так и практической значимостью для проектирования и оптимизации подшипников скольжения, функционирующих в сложных эксплуатационных условиях.

Ключевые слова: радиальный подшипник скольжения; антифрикционное покрытие; полимерные композиционные материалы; число Рейнольдса; гидродинамический режим смазывания; математическое моделирование; инерционные эффекты; коэффициент трения; несущая способность.

Improving the accuracy of predicting the characteristics of plain bearings taking into account nonlinear factors

Е.А. Bolgova^a, V.A. Kokhanovsky^b, M.A. Mukutadze^c

Rostov State Transport University; 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolchenia Sq., Rostov-on-Don, Russia

^a bolgova_katya6@mail.ru, ^b vcohan@yandex.ru, ^c murman1963@yandex.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-0737-1846>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-7973-9833>,

^c <https://orcid.org/0000-0003-2810-3047>

Received 18.12.2025, accepted 03.02.2026

The article considers the influence of nonlinear factors on the tribological characteristics of radial plain bearings with antifriction polymer coatings. The main attention is paid to the development and justification of a mathematical model describing the motion of a viscous lubricant in the gap between the coated shaft and the bearing support surface, taking into account the geometric features of the coating (in particular, the presence of an axial groove) and the rheological properties of the lubricant. The main contribution of the work is the development of a new mathematical model intended for the design of radial bearings. This technique is based on a system of nonlinear equations describing the motion of a truly viscous lubricant and takes into account its rheological characteristics, as well as the requirements of the continuity equation. As a result, new mathematical models are formulated that allow a quantitative assessment of the effect of the Reynolds number on the processes occurring in the bearing lubricating layer. The model is verified based on experimental data obtained during tests of metal-polymer bearings on a modernized friction machine. The analysis of experimental and calculated data shows a discrepancy of no more than 5 %, which confirms the reliability of the model. The obtained results allow to increase the accuracy of calculations of the bearing capacity and friction coefficient by 7–15 % and 5–13 %, respectively. The work has both scientific novelty and practical significance for the design and optimization of plain bearings operating in difficult operating conditions.

Keywords: radial plain bearing; antifriction coating; polymer composite materials; Reynolds number; hydrodynamic lubrication; mathematical modeling; inertial effects; friction coefficient; load-bearing capacity.

Введение. Надёжность и эффективность работы современных машин и механизмов в значительной степени определяются эксплуатационными характеристиками трибосопряжений, в частности, подшипников скольжения. В условиях интенсивного износа и сложных режимов работы возрастает потребность в разработке конструктивных решений, обеспечивающих высокую износостойкость, стабильность коэффициента трения и длительный срок службы подшипников [1–3]. Это особенно актуально для машиностроительных отраслей, где оборудование функционирует при переменных нагрузках, вибрациях и в агрессивных средах [4–6].

Одним из перспективных направлений повышения эксплуатационной надёжности подшипников скольжения является применение антифрикционных композиционных покрытий, обладающих высокой несущей способностью и самосмазывающимися свойствами [7–10]. Наибольший интерес представляют фторопластосодержащие покрытия, которые широко используются в аэрокосмической и транспортной технике. Однако существующие расчётные модели, как правило, упрощают описание процессов, протекающих в смазочном слое, и не учитывают важные нелинейные факторы, в том числе влияние инерционных сил и числа Рейнольдса [11–14].

При проектировании подшипников с полимерными покрытиями особенно важно учитывать характер течения смазки в зазоре. Число Рейнольдса позволяет определить режим течения (ламинарный или турбулентный), который существенно влияет на распределение давления, теплоотвод и несущую способность подшипника. Пренебрежение этим параметром может привести к значительным погрешностям в расчётах. В условиях высоких скоростей скольжения и малых зазоров инерционные эффекты становятся доминирующими, что требует применения более сложных, нелинейных моделей, учитывающих реальные реологические свойства смазочных материалов [15–18].

В связи с этим возникает необходимость в разработке математической модели, которая бы адекватно описывала поведение смазочного материала в тонком слое при учёте влияния нелинейных факторов, включая число Рейнольдса, особенности геометрии канавки на валу и физико-химические характеристики полимерного покрытия.

Кроме того, необходимо проводить экспериментальные исследования для валидации разработанных математических моделей и численных методов. Такие исследования должны включать измерение распределения

давления в смазочном слое, температуры и деформации полимерного покрытия при различных режимах работы подшипника. Полученные экспериментальные данные позволят уточнить параметры моделей и повысить их адекватность.

Цель настоящего исследования – разработка математической модели для анализа триботехнических характеристик подшипников скольжения с антифрикционным полимерным покрытием, с учётом инерционных факторов, а также верификация этой модели на основе экспериментальных данных.

Научная новизна представленной работы заключается в разработке нового, комплексного подхода к моделированию течения смазочного материала в зазоре подшипника с полимерным покрытием. Впервые, в рамках единой модели, учтены не только классические факторы, но и нелинейные эффекты, обусловленные инерционными силами, изменение вязкости смазочного материала под воздействием давления, а также сложная геометрия канавки на полимерном покрытии.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их применения при проектировании подшипников скольжения, работающих в тяжёлых эксплуатационных условиях. Разработанная модель позволяет значительно повысить точность расчёта несущей способности и коэффициента трения, что способствует увеличению ресурса и надёжности машин.

Методика проведения исследований. Рассматривается установившееся движение смазочного материала между цапфой, имеющей полимерное покрытие с канавкой, и адаптированным к нагрузкам опорным профилем радиального подшипника. Скорость вращения вала принята равной Ω [19], а нестандартной втулки – нулю (рис. 1).

В системе координат r', θ с полюсом в центре вала уравнения контура вала с покрытием C_1 , вала без покрытия (с канавкой) C_0 , подшипниковой втулки с адаптированным профилем опорной поверхности C_2 и подшипниковой втулки C_3 запишутся в виде:

$$\begin{aligned} C_1 : r' &= r_0, \quad C_0 : r' = r_0 - \tilde{h}, \\ C_2 : r' &= r_1(1 + H) - a' \sin \omega \theta, \quad C_3 : r' = r_1(1 + H), \end{aligned} \quad (1)$$

где r_0 – радиус вала с полимерным покрытием; \tilde{h} – высота канавки; r_1 – радиус подшипниковой втулки; H – толщина смазочного слоя; a' – постоянная; θ – угловая координата.

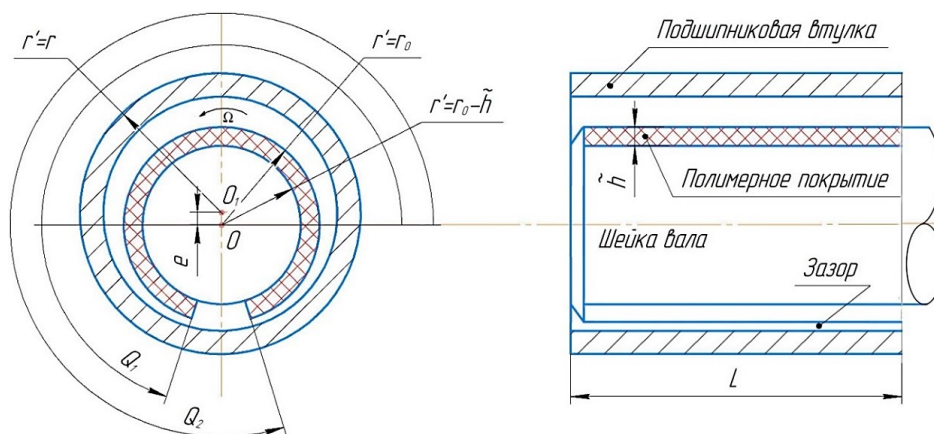


Рис. 1. Расчётная схема трибоконтакта

Зависимость реологических свойств смазочного материала от давления задаётся следующим выражением:

$$\mu' = \mu_0 e^{\alpha' p'}, \quad (2)$$

где μ' – коэффициент динамической вязкости смазочного материала; μ_0 – характерная вязкость; e – эксцентриситет; p' – гидродинамическое давление в смазочном слое.

Исходными базовыми уравнениями для решения данной задачи являются нелинейные уравнения движения несжимаемой жидкости для «тонкого слоя» с учётом (2) и уравнение неразрывности

$$\frac{\partial p'_i}{\partial r'} = 0; \quad \mu' \frac{\partial^2 v_{\theta_i}}{\partial r'^2} = \frac{dp'_i}{d\theta} + \rho \left(v_{r'_i} \frac{\partial v'_{\theta_i}}{\partial r'_i} + \frac{v'_{\theta_i}}{r'_i} \frac{\partial v'_{\theta_i}}{\partial \theta_i} - \frac{v'_{r'_i} v'_{\theta_i}}{r'_i} \right),$$

$$\frac{\partial v_{r'_i}}{\partial r'} + \frac{v_{r'_i}}{r'} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v_{\theta_i}}{\partial \theta} = 0, \quad (3)$$

где $v_{\theta_i}, v_{r'_i}$ – компоненты вектора скорости смазочной среды.

Система уравнений (3) решается при следующих граничных условиях:

$$v_{r'} = 0, \quad v_{\theta} = 0 \quad \text{при} \quad r' = r_1 (1 + H) - a' \sin \omega \theta = h'(\theta),$$

$$v_{r'} = 0, \quad v_{\theta} = \Omega r_0 \quad \text{при} \quad r' = r_0,$$

$$v_{r'} = 0, \quad v_{\theta} = \Omega (r_0 - \tilde{h}) \quad \text{при} \quad r' = r_0 - \tilde{h},$$

$$p'(0) = p'(\theta) = p_g, \quad r_0 - \tilde{h} = h_0^* \quad \text{при} \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2, \quad (4)$$

где p_g – давление подачи смазки; h_0^* – толщина полимерного покрытия, Ω – угловая скорость вала.

Переход к безразмерным величинам реализуется на основе следующих формул:

$$v_{\theta} = \Omega v (r_0 - \tilde{h}), \quad v_{r'} = \Omega \delta u, \quad p' = p^* p, \quad p^* = \frac{\mu_0 \Omega (r_0 - \tilde{h})^2}{\delta^2}$$

$$\mu' = \mu_0 \mu, \quad \alpha' = \frac{\alpha}{\delta^3}, \quad (5)$$

$$r' = (r_0 - \tilde{h}) + \delta r, \quad \delta = r_1 - (r_0 - \tilde{h})$$

Выполняя подстановку (5) в систему дифференциальных уравнений (3) с учётом граничных условий (4), получим:

$$\frac{\partial p_i}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} = e^{-\alpha p} \frac{dp_i}{d\theta} + \text{Re} \left(u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial \theta} \right);$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial r} + \frac{\partial v_i}{\partial \theta} = 0 \quad (6)$$

$$u = 0, \quad v = 1 \quad \text{при} \quad r = r_0 - \tilde{h}$$

$$u = 0, \quad v = 1 \quad \text{при} \quad r = r_0$$

$$u = 0, \quad v = 0 \quad \text{при} \quad r = 1 + \eta \cos \theta - \eta_1 \sin \omega \theta = h(\theta)$$

$$p(\theta) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{p_g}{p}, \quad (7)$$

где $\eta = \frac{e}{\delta}$, $\eta_1 = \frac{a'}{\delta}$, $\text{Re} = \frac{\Omega \delta^2}{\nu}$ – число Рейнольдса.

Введём обозначения $z = e^{-\alpha p}$ и, сделав ряд преобразований, в результате получим

$$\frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} = -\frac{1}{\alpha} \frac{dz_i}{d\theta} + z_i \text{Re} \left(u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial \theta} \right); \quad \frac{\partial u_i}{\partial r} + \frac{\partial v_i}{\partial \theta} = 0 \quad (8)$$

с соответствующими граничными условиями:

$$v = 0, \quad u = 0 \quad \text{при} \quad r = h(\theta);$$

$$v = 1, \quad u = 0 \quad \text{при} \quad r = r_0 - \tilde{h}, \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2;$$

$$v = 0, \quad u = 0 \quad \text{при} \quad r = r_0, \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{и} \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi;$$

$$z(0) = z(\theta_1) = z(\theta_2) = z(2\pi) = e^{-\alpha \frac{p_g}{p}}. \quad (9)$$

В первом уравнении системы (8) нелинейные члены осредним по методу Слезкина – Тарга. Введём следующие обозначения:

$$D_i(\theta) = \frac{\text{Re}}{h_i(\theta)} \int_0^{h_i(\theta)} \left(u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial \theta} \right) dr \quad (10)$$

Автомодельное решение задачи (8) с учётом (9) и (10) находим по известному методу [20]:

$$v_i = \frac{\partial \Psi_i}{\partial r} + V_i(r, \theta); \quad u_i = \frac{\partial \Psi_i}{\partial \theta} + U_i(r, \theta);$$

$$\Psi_i(r, \theta) = \tilde{\Psi}_i(\xi_i); \quad V_i(r, \theta) = \tilde{v}_i(\xi_i); \quad U_i(r, \theta) = -\tilde{u}_i(\xi_i) \cdot h'(\theta);$$

$$\xi_i = \frac{r_i}{h(\theta)} \quad \text{при} \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{и} \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi;$$

$$\xi_i = \frac{r + \tilde{h}}{h(\theta) + \tilde{h}} \quad \text{при} \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \quad (11)$$

В результате для поля скоростей и давления имеем:

$$\tilde{\Psi}'''(\xi) = a_i, \quad \tilde{v}_i''(\xi) = b_i, \quad \tilde{u}_i'(\xi) + \xi_i \tilde{v}_i'(\xi) = 0 \quad (12)$$

$$\frac{dz_i}{d\theta} = \alpha \left(D_i(\theta) z_i - \frac{b_i}{h^2(\theta)} - \frac{a_i}{h^3(\theta)} \right), \quad i = 1, 3;$$

$$\frac{dz_2}{d\theta} = \alpha \left(D_2(\theta) z_2 - \frac{b_2}{(h(\theta) + \tilde{h})^2} - \frac{a_2}{(h(\theta) + \tilde{h})^3} \right) \quad (13)$$

$$D_i(\theta) = \text{Re} \int_0^1 \left(\frac{\tilde{\Psi}'(\xi_i) h'_i(\theta)}{h^2(\theta)} + \tilde{u}_i h'(\theta) \right) \left(\frac{\tilde{\Psi}_i''(\xi_i)}{h_i^2(\theta)} + \frac{\tilde{v}_i'(\xi_i)}{h_i(\theta)} \right) +$$

$$+ \left(\frac{\tilde{\Psi}_i'(\xi_i)}{h_i(\theta)} + \tilde{v}_i(\xi) \right) \times$$

$$\times \left(\frac{\tilde{\Psi}_i'(\xi_i)}{h^2(\theta)} h'(\theta) - \frac{\tilde{\Psi}_i''(\xi_i) h'_i(\theta)}{h_i^2(\theta)} - \frac{\tilde{v}_i'(\xi_i) h'_i(\theta)}{h_i(\theta)} \right) d\xi \quad (14)$$

с граничными условиями

$$\tilde{\Psi}_i'(\xi_i) = 0 \quad \text{при} \quad \xi = 0, \quad \xi = 1; \quad \tilde{v}_i(\xi_i) = 0 \quad \text{при} \quad \xi = 0, \quad \xi = 1;$$

$$\tilde{u}_i = 0 \quad \text{при} \quad \xi = 0, \quad \xi = 1; \quad \int_0^1 \tilde{v}_i(\xi_i) d\xi_i = 0;$$

$$z(0) = z(\theta_1) = z(\theta_2) = z(2\pi) = e^{-\alpha \frac{p_g}{p}} \quad (15)$$

Интегрируя уравнение (14) с учётом (15), в результате получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}'_1(\xi_1) &= a_1 \frac{\xi_1}{2}(\xi_1 - 1), \\ \tilde{v}_1(\xi_1) &= b_1 \frac{\xi_1^2}{2} - \left(1 + \frac{b_1}{2}\right)\xi_1 + 1; \\ \tilde{\Psi}'_2(\xi_2) &= a_2 \frac{\xi_2}{2}(\xi_2 - 1), \\ \tilde{v}_2(\xi_2) &= b_2 \frac{\xi_2^2}{2} - \left(1 + \frac{b_2}{2}\right)\xi_2 + 1; \\ \tilde{\Psi}'_3(\xi_3) &= a_3 \frac{\xi_3}{2}(\xi_3 - 1), \\ \tilde{v}_3(\xi_3) &= b_3 \frac{\xi_3^2}{2} - \left(1 + \frac{b_3}{2}\right)\xi_3 + 1 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} z_1 &= \alpha \left[\int_0^{\theta_1} \tilde{D}_1(\theta) d\theta z_1 - b_1 \int_0^{\theta_1} \frac{d\theta}{h^2(\theta)} - a_1 \int_0^{\theta_1} \frac{d\theta}{h^3(\theta)} \right] + e^{-\alpha \frac{p_g}{p}}; \\ z_2 &= \alpha \left[\int_{\theta_1}^{\theta_2} \tilde{D}_2(\theta) d\theta z_2 - b_2 \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{d\theta}{(h(\theta) + \tilde{h})^2} - a_2 \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{d\theta}{(h(\theta) + \tilde{h})^3} \right] + e^{-\alpha \frac{p_g}{p}}; \\ z_3 &= \alpha \left[\int_{\theta_2}^{\theta} \tilde{D}_3(\theta) d\theta z_3 - b_3 \int_{\theta_2}^{\theta} \frac{d\theta}{h^2(\theta)} - a_2 \int_{\theta_2}^{\theta} \frac{d\theta}{h^3(\theta)} \right] + e^{-\alpha \frac{p_g}{p}} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \tilde{D}_i(\theta) &= \operatorname{Re} \left(\frac{3a_i}{40} \frac{h'(\theta)}{h^2(\theta)} + \frac{17}{30} \frac{h'(\theta)}{h(\theta)} + \frac{a_i^2}{120} \frac{h'(\theta)}{h^3(\theta)} \right), \quad i = 1, 3; \\ \tilde{D}_2(\theta) &= \operatorname{Re} \left(\frac{3a_2}{40} \frac{(h(\theta) + \tilde{h})'}{(h(\theta) + \tilde{h})^2} + \frac{17}{30} \frac{(h(\theta) + \tilde{h})'}{h(\theta) + \tilde{h}} + \frac{a_2^2}{120} \frac{(h(\theta) + \tilde{h})'}{h^3(\theta)} \right). \end{aligned} \quad (18)$$

Из уравнения $v_i(\xi_i) = b_i \frac{\xi_i^2}{2} + \left(1 - \frac{b_i}{2}\right)\xi_i + 1$ следует, что

$$b_1 = b_2 = b_3 = 6 \quad (19)$$

Также из равенства

$$z(0) = z(\theta_1) = z(\theta_2) = z(2\pi) = e^{-\alpha \frac{p_g}{p}} \text{ имеем:}$$

$$\begin{aligned} a_1 &= -\frac{4,21}{1 + z_1 \operatorname{Re}(0,006)}; \\ a_2 &= \frac{1,42}{1 + z_2 \operatorname{Re}(0,0107)}; \\ a_3 &= \frac{2,74}{1 + z_3 \operatorname{Re}(0,012)} \end{aligned} \quad (20)$$

Зная значения a_1, a_2, a_3 , а также используя ранее установленные значения: ширины осевой канавки, равной 4 мм ($\theta_1 = 264^\circ 27'$, $\theta_2 = 275^\circ 73'$), глубины осевой канавки, из уравнения (16) с учётом (17), (18) и (19) получим

$$\begin{aligned} z_1 &= \alpha \left[\operatorname{Re} \frac{\frac{12,63}{1 + z_1 \operatorname{Re}(0,006)}}{40(1 + \eta(\cos \theta - 1) - \eta_1 \sin \omega \theta)} - \right. \\ &\quad \left. - 6 \left(\theta - 2\eta \sin \theta - \frac{2\eta_1}{\omega} (\cos \theta - 1) \right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{4,21}{1 + z_1 \operatorname{Re}(0,006)} \left(\theta - 3\eta \sin \theta - \frac{3\eta_1}{\omega} (\cos \theta - 1) \right) \right] + e^{-\alpha \frac{p_g}{p}}; \\ z_2 &= \operatorname{Re} \frac{\frac{-4,26}{1 + z_2 \operatorname{Re}(0,0107)}}{40(1 + \tilde{h} + \eta(\cos \theta - \cos \theta_1) - \eta_1(\sin \omega \theta - \sin \omega \theta_1))} - \\ &\quad - 6 \frac{\theta - \theta_1 - 2\tilde{\eta}(\sin \theta - \sin \theta_1) - \frac{2\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \theta - \cos \theta_1)}{(1 + \tilde{h})^2} - \\ &\quad - \frac{1,42}{1 + z_2 \operatorname{Re}(0,0107)} \times \\ &\quad \times \frac{\theta - \theta_1 - 3\tilde{\eta}(\sin \theta - \sin \theta_1) - \frac{3\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \theta - \cos \theta_1)}{(1 + \tilde{h})^3} + e^{-\alpha \frac{p_g}{p}}; \\ z_3 &= \operatorname{Re} \frac{\frac{8,22}{1 + z_3 \operatorname{Re}(0,012)}}{40(1 + \eta(\cos \theta - \cos \theta_2) - \eta_1(\sin \omega \theta - \sin \omega \theta_2))} - \\ &\quad - 6 \left(\theta - \theta_2 - 2\eta(\sin \theta - \sin \theta_2) - \frac{2\eta_1}{\omega} (\cos \theta - \cos \theta_2) \right) - \\ &\quad - \frac{2,74}{1 + z_3 \operatorname{Re}(0,012)} \left(\theta - \theta_2 - 3\eta(\sin \theta - \sin \theta_2) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{3\eta_1}{\omega} (\cos \theta - \cos \theta_2) \right). \end{aligned} \quad (21)$$

$$\text{где } \tilde{\eta} = \frac{\eta}{1 + \tilde{h}}; \quad \tilde{\eta}_1 = \frac{\eta_1}{1 + \tilde{h}}.$$

Применив разложение функций $e^{-\alpha p}$ и $e^{-\alpha \frac{p_g}{p}}$ в ряд Тейлора и выполнив преобразования, получим:

$$\begin{aligned} p_1 &= \frac{p_g}{p^*} + \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \times \\ &\quad \times \left[\operatorname{Re} \frac{\frac{12,63}{1 + \operatorname{Re}(0,06)}}{40(1 + \eta(\cos \theta - 1) - \eta_1 \sin \omega \theta)} - \right. \\ &\quad \left. - 6 \left(\theta - 2\eta \sin \theta - \frac{2\eta_1}{\omega} (\cos \theta - 1) \right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{4,21}{1 + \operatorname{Re}(0,06)} \left(\theta - 3\eta \sin \theta - \frac{3\eta_1}{\omega} (\cos \theta - 1) \right) \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p_2 = & \frac{p_g}{p^*} + \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \times \\
 & \times \left[\operatorname{Re} \frac{-4,26}{1 - \operatorname{Re}(0,0107)} - \frac{6 \left(\theta - \theta_1 - 2\tilde{\eta}(\sin \theta - \sin \theta_1) - \frac{2\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \theta - \cos \theta_1) \right)}{(1 + \tilde{h})^2} - \frac{1,42}{1 + \operatorname{Re}(0,0107)} \times \right. \\
 & \left. \frac{\theta - \theta_1 - 3\tilde{\eta}(\sin \theta - \sin \theta_1) - \frac{3\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \theta - \cos \theta_1)}{(1 + \tilde{h})^3} \right] \times \\
 p_3 = & \frac{p_g}{p^*} + \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \times \\
 & \times \left[\operatorname{Re} \frac{-8,22}{1 + \operatorname{Re}(0,012)} - \frac{-6 \left(\theta - \theta_2 - 2\eta(\sin \theta - \sin \theta_2) - \frac{2\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \theta - \cos \theta_2) \right)}{1 + \operatorname{Re}(0,012)} \left(\theta - \theta_2 - 3\eta(\sin \theta - \sin \theta_2) - \frac{3\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \theta - \cos \theta_2) \right) \right]. \quad (22)
 \end{aligned}$$

Зная выражения гидродинамического давления и скорости, найдём аналитические выражения для несущей способности и силы трения:

$$\begin{aligned}
 R_x = & p^* r \left[\int_0^{\theta_1} \left(p_1 - \frac{p_g}{p^*} \right) \cos \theta d\theta + \right. \\
 & \left. + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(p_2 - \frac{p_g}{p^*} \right) \cos \theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} \left(p_3 - \frac{p_g}{p^*} \right) \cos \theta d\theta \right] = \\
 = & \frac{6\mu_0 r_0^3 \Omega}{2\delta^2} \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left[\operatorname{Re} \frac{0,316}{1 + \operatorname{Re}(0,006)} \times \right. \\
 & \left. \times \left(\sin \theta_1 - \frac{\eta}{2} \left(\theta_1 + \frac{1}{2} \sin 2\theta_1 \right) + \eta \sin \theta_1 - \right. \right. \\
 & \left. \left. - \frac{\eta_1}{2} \left(\frac{1}{\omega+1} (\cos(\omega+1)\theta_1 - 1) - \frac{1}{\omega-1} (\cos(\omega-1)\theta_1 - 1) \right) - \right. \right. \\
 & \left. \left. - 6 \left(\theta_1 \sin \theta_1 + \cos \theta_1 - 1 + \frac{\eta}{2} (\cos 2\theta_1 - 1) - \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. - \frac{2\eta_1}{\omega} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\sin(\omega+1)\theta_1}{\omega+1} + \frac{\sin(\omega-1)\theta_1}{\omega-1} \right) - \sin \theta_1 \right) \right) \right] +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{4,21}{1 + \operatorname{Re}(0,006)} \left(\theta_1 \sin \theta_1 + \cos \theta_1 - 1 + \frac{3\eta}{4} (\cos 2\theta_1 - 1) - \right. \\
 & \left. - \frac{3\eta_1}{\omega} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\sin(\omega+1)\theta_1}{\omega+1} + \frac{\sin(\omega-1)\theta_1}{\omega-1} \right) - \sin \theta_1 \right) \right) - \\
 & - \operatorname{Re} \frac{0,106}{(1 + \operatorname{Re}(0,0107))(1 + \tilde{\eta})} \left(\sin \theta_2 - \sin \theta_1 - \frac{\tilde{\eta}}{2} \times \right. \\
 & \left. \times \left(\theta_2 - \theta_1 + \frac{1}{2} (\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1) + \tilde{\eta} \cos \theta_1 (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \right) - \right. \\
 & \left. - \frac{\tilde{\eta}_1}{2} \left(\frac{\cos(\omega+1)\theta_2 - \cos(\omega+1)\theta_1}{\omega+1} + \frac{\cos(\omega-1)\theta_2 - \cos(\omega-1)\theta_1}{\omega-1} \right) - \right. \\
 & \left. - \tilde{\eta}_1 \sin \omega \theta_1 (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \right) - \\
 & - \frac{6(\theta_2 \sin \theta_2 - \theta_1 \sin \theta_1 + \cos \theta_2 - \cos \theta_1 - \theta_1 (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) -}{(1 + \tilde{h})^2} - \\
 & - \frac{2\tilde{\eta} \left(-\frac{1}{4} (\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1) - \sin \theta_1 (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \right) - \frac{2\tilde{\eta}_1}{\omega} \times}{(1 + \tilde{h})^2} \\
 & \times \left(\frac{\sin(\omega+1)\theta_2 - \sin(\omega+1)\theta_1}{2(\omega+1)} + \frac{\sin(\omega-1)\theta_2 - \sin(\omega-1)\theta_1}{2(\omega-1)} \right) - \\
 & - \frac{\cos \omega \theta_1 (\sin \theta_2 - \sin \theta_1)}{(1 + \tilde{h})^2} \left. \right) - \\
 & - \frac{1,42}{1 + \operatorname{Re}(0,0107)(1 + \tilde{h})^3} (\theta_2 \sin \theta_2 - \theta_1 \sin \theta_1 + \\
 & + \cos \theta_2 - \cos \theta_1 - \theta_1 (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) - \\
 & - 3\tilde{\eta} \left(-\frac{1}{4} (\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1) - \sin \theta_1 (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \right) - \\
 & - \frac{3\eta_1}{\omega} \left(\frac{\sin(\omega+1)\theta_2 - \sin(\omega+1)\theta_1}{2(\omega+1)} + \frac{\sin(\omega-1)\theta_2 - \sin(\omega-1)\theta_1}{2(\omega-1)} - \right. \\
 & \left. - \cos \omega \theta_1 (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \right) \left. \right) + \\
 & + \operatorname{Re} \frac{0,2055}{1 - \operatorname{Re}(0,012)} \left(\sin \theta_2 - \sin \theta_1 - \frac{\eta}{2} \times \right. \\
 & \left. \times \left(2\pi - \theta_2 - \frac{1}{2} \sin 2\theta_2 - \eta \cos \theta_2 \sin \theta_2 - \right. \right. \\
 & \left. \left. - \frac{\eta_1}{2} \left(\frac{\cos 2\pi(\omega+1) - \cos(\omega+1)\theta_2}{\omega+1} + \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. + \frac{\cos 2\pi(\omega-1) - \cos(\omega-1)\theta_2}{\omega-1} \right) - \eta_1 \sin \omega \theta_2 \sin \theta_2 \right) - \right. \\
 & \left. - 6(-\theta_2 \sin \theta_2 + 1 - \cos \theta_2 + \theta_2 \sin \theta_2 - \right. \\
 & \left. - 2\eta \left(-\frac{1}{4} (1 - \cos 2\theta_1) + \sin^2 \theta_2 \right) - \right. \\
 & \left. - \frac{2\eta_1}{\omega} \left(\frac{\sin 2\pi(\omega+1) - \sin(\omega+1)\theta_2}{2(\omega+1)} + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{\sin 2\pi(\omega-1) - \sin(\omega-1)\theta_2}{2(\omega-1)} + \cos \omega \theta_2 \sin \theta_2 \right) \right) -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{2,74}{1+\operatorname{Re}(0,012)}(-\theta_2 \sin \theta_2 + 1 - \cos \theta_2 + \theta_2 \sin \theta_2 - \\
 & -3\eta\left(-\frac{1}{4}(\cos 2\theta_2) + \sin^2 \theta_2\right) - \frac{3\eta_1}{\omega} \times \\
 & \left(\frac{\sin 2\pi(\omega+1) - \sin(\omega+1)\theta_2}{2(\omega+1)} + \right. \\
 & \left. + \frac{\sin 2\pi(\omega-1) - \sin(\omega-1)\theta_2}{2(\omega-1)} - \cos \omega\theta_2 \sin \theta_2\right) \Bigg) \\
 & R_y = p^* r \left[\int_0^{\theta_1} \left(p_1 - \frac{p_g}{p^*}\right) \sin \theta d\theta + \right. \\
 & \left. + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(p_2 - \frac{p_g}{p^*}\right) \sin \theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} \left(p_3 - \frac{p_g}{p^*}\right) \sin \theta d\theta \right] = \\
 & = \frac{6\mu_0 r_0^3 \Omega}{\delta^2} \left[\operatorname{Re} \frac{0,315}{1+\operatorname{Re}(0,006)} \times \right. \\
 & \times \left((1 - \cos \theta_1)(1 - \eta) + \frac{\eta}{4}(\cos 2\theta_1 - 1) - \right. \\
 & \left. - \frac{\eta_1}{\omega} \left(\frac{\sin(\omega+1)\theta_1}{\omega+1} - \frac{\sin(\omega-1)\theta_1}{\omega-1} \right) \right] - \\
 & 6 \left(-\theta_1 \cos \theta_1 + \sin \theta_1 - \eta \left(\theta_1 - \frac{1}{2} \sin 2\theta_1 \right) + \right. \\
 & \left. + \frac{2\eta_1}{\omega} \left(\frac{\cos(\omega+1)\theta_1 - 1}{2(\omega+1)} + \frac{\cos(\omega-1)\theta_1 - 1}{2(\omega-1)} - \frac{2\eta_1}{\omega} \sin \theta_1 \right) + \right. \\
 & \left. + \frac{4,21}{1+\operatorname{Re}(0,006)} \left(-\theta_1 \cos \theta_1 + \sin \theta_1 - \frac{3\eta}{2} \left(\theta_1 - \frac{1}{2} \sin 2\theta_1 \right) + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{3\eta_1}{\omega} \left(\frac{\cos(\omega+1)\theta_1 - 1}{2(\omega+1)} + \frac{\cos(\omega-1)\theta_1 - 1}{2(\omega-1)} \right) - \frac{3\eta_1}{\omega} \sin \theta_1 \right) - \right. \\
 & \left. - \operatorname{Re} \frac{0,106}{(1+\tilde{\eta})(1+\operatorname{Re}(0,0107))} \times \right. \\
 & \times \left(\frac{\tilde{\eta}}{4}(\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1) + (1 - \tilde{\eta} \cos \theta_1)(\cos \theta_2 - \cos \theta_1) - \right. \\
 & \left. + \frac{\tilde{\eta}_1}{2} \left(\frac{\sin(\omega+1)\theta_2 - \sin(\omega+1)\theta_1}{\omega+1} - \right. \right. \\
 & \left. \left. - \frac{\sin(\omega-1)\theta_2 - \sin(\omega-1)\theta_1}{\omega-1} \right) + \right. \\
 & \left. + \tilde{\eta}_1 \sin \omega\theta_1 (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \right) - \\
 & - \frac{6}{(1+\tilde{h})^2} (\theta_2 \cos \theta_2 + \theta_1 \cos \theta_1 + \sin \theta_2 - \sin \theta_1 + \\
 & + (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \left(\theta_1 - 2\tilde{\eta} \sin \theta_1 - \frac{2\eta_1}{2} \cos \omega\theta_1 \right) - \\
 & - \tilde{\eta} \left(\theta_2 - \theta_1 - \frac{1}{2}(\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1) \right) + \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} \times \\
 & \times \left(\frac{\cos(\omega+1)\theta_2 - \cos(\omega+1)\theta_1}{\omega+1} + \frac{\cos(\omega-1)\theta_2 - \cos(\omega-1)\theta_1}{\omega-1} \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1,42}{(1+\tilde{h}^3)+\operatorname{Re}(0,0107)}(-\theta_2 \cos \theta_2 + \theta_1 \cos \theta_1 + \sin \theta_2 - \\
 & -\sin \theta_1 + \theta_1 (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \left(\theta_1 - 3\tilde{\eta} \sin \theta_1 - \frac{3\tilde{\eta}_1}{\omega} \cos \omega\theta_1 \right) \\
 & - \frac{3\tilde{\eta}}{2} \left(\theta_2 - \theta_1 - \frac{1}{2}(\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1) \right) + \frac{3\eta_1}{2\omega} + \\
 & \left(\frac{\cos(\omega+1)\theta_2 - \cos(\omega+1)\theta_1}{\omega+1} + \frac{\cos(\omega-1)\theta_2 - \cos(\omega-1)\theta_1}{\omega-1} \right) + \\
 & + \operatorname{Re} \frac{0,205}{1+\operatorname{Re}(0,012)} \left(\frac{\eta}{4}(1 - \cos 2\theta_2) + (1 - \tilde{\eta} \cos \theta_2)(1 - \cos \theta_2) - \right. \\
 & \left. - \frac{\eta_1}{2} \left(\frac{\sin 2\pi(\omega+1) - \sin(\omega+1)\theta_2}{\omega+1} - \right) \right) - \\
 & - \frac{\sin 2\pi(\omega-1) - \sin(\omega-1)\theta_2}{\omega-1} \Bigg) + \eta_1 \sin \omega\theta_2 (1 - \cos \theta_2) \Bigg) - \\
 & - 6(-2\pi + \theta_2 \cos \theta_2 - \sin \theta_2 + (1 - \cos \theta_2) \times \\
 & \left(\theta_2 - 2\eta \sin \theta_2 - \frac{2\eta}{\omega} \cos \omega\theta_2 \right) - \eta \left(2\pi - \theta_2 + \frac{1}{2} \sin 2\theta_2 \right) + \\
 & + \frac{\eta_1}{\omega} \left(\frac{\cos 2\pi(\omega+1) - \cos(\omega+1)\theta_2}{\omega+1} + \right. \\
 & \left. + \frac{\cos 2\pi(\omega-1) - \cos(\omega-1)\theta_2}{\omega-1} \right) - \\
 & - \frac{2,74}{1+\operatorname{Re}(0,012)}(-2\pi + \theta_2 \cos \theta_2 - \sin \theta_2 + \\
 & + (1 - \cos \theta_2) \left(\theta_2 - 3\eta \sin \theta_2 - \frac{3\eta}{\omega} \cos \omega\theta_2 \right) - \\
 & - \frac{3\eta}{2} \left(2\pi - \theta_2 + \frac{1}{2} \sin 2\theta_2 \right) + \frac{3\eta_1}{2\omega} \times \\
 & \times \left(\frac{\cos 2\pi(\omega+1) - \cos(\omega+1)\theta_2}{\omega+1} + \frac{\cos 2\pi(\omega-1) - \cos(\omega-1)\theta_2}{\omega-1} \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 L_{\text{np}} = \mu_0 \Bigg[& \int_0^{\theta_1} \left(\frac{\tilde{\Psi}_1''(\theta)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{v}_1(\theta)}{h(\theta)} \right) d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(\frac{\tilde{\Psi}_2''(\theta)}{(h(\theta) + \tilde{h})^2} + \frac{\tilde{v}_2(\theta)}{h(\theta) + \tilde{h}} \right) = \\
 & d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} \left(\frac{\tilde{\Psi}_3''(\theta)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{v}_3(\theta)}{h(\theta)} \right) d\theta \Bigg] = \\
 & = \mu_0 \left(1 - \alpha p + \frac{\alpha^2 p^2}{2} \right) \left[\frac{2,105}{1+\operatorname{Re}(0,006)} + \right. \\
 & \left. + \left(\theta_1 - 2\eta \sin \theta_1 - \frac{2\eta_1}{\omega} (\cos \omega\theta_1 - 1) \right) + \right. \\
 & \left. + 4 \left(\theta_1 - \eta \sin \theta_1 - \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega\theta_1 - 1) \right) - \right. \\
 & \left. - \frac{0,71}{1+\operatorname{Re}(0,0107)} (\theta_2 - \theta_1 - 2\eta (\sin \theta_2 - \sin \theta_1)) - \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{2\eta_1}{\omega}(\cos \omega\theta_2 - \cos \omega\theta_1) + 4 \times \\
 & \times \left(\theta_2 - \theta_1 - \eta(\sin \theta_2 - \sin \theta_1) - \frac{\eta_1}{\omega}(\cos \omega\theta_2 - \cos \omega\theta_1) \right) - \\
 & -\frac{1,37}{1 + \operatorname{Re}(0,012)} \left(2\pi - \theta_2 + 2\eta \sin \theta_2 - \frac{2\eta_1}{\omega}(\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_2) \right) + \\
 & + 4 \left(2\pi - \theta_2 + \eta \sin \theta_2 - \frac{\eta_1}{\omega}(\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_2) \right) \Big]. \quad (23)
 \end{aligned}$$

В ходе проведённого исследования осуществлена статистическая обработка данных, позволившая установить степень значимости выявленных изменений.

Таблица 1. Сравнение численных результатов

Несущая способность, $\frac{H}{m^2}$					Коэффициент трения				
В работе	[6]	[19]	Отличие		В работе	[6]	[19]	Отличие	
			[6] %	[19] %				[6] %	[19] %
$1,0 \cdot 10^5$	$0,87 \cdot 10^5$	$0,93 \cdot 10^5$	13	7	0,0361	0,039	0,0384	8	6
$2,0 \cdot 10^5$	$1,71 \cdot 10^5$	$1,85 \cdot 10^5$	15	8	0,0135	0,0151	0,0142	12	5
$3,0 \cdot 10^5$	$2,58 \cdot 10^5$	$2,74 \cdot 10^5$	14	9	0,0080	0,009	0,0086	13	8
$4,0 \cdot 10^5$	$3,49 \cdot 10^5$	$3,72 \cdot 10^5$	13	7	0,0060	0,0067	0,0064	12	7
$5,0 \cdot 10^5$	$4,25 \cdot 10^5$	$4,49 \cdot 10^5$	15	10	0,0075	0,0082	0,0079	9	5

Для верификации разработанной математической модели и оценки её применимости в условиях реального трения были проведены лабораторные испытания металлополимерных подшипников скольжения с антифрикционными полимерными покрытиями на основе полиамида и политетрафторэтилена. Целью эксперимента являлось установление соответствия расчётных данных, полученных на основе численного моделирования, и фактических показателей, измеренных в ходе испытаний.

Экспериментальные исследования проводились на модернизированной машине трения ИИ-5018, адаптированной для изучения характеристик гидродинамического режима смазывания. Испытания выполнялись с постепенным увеличением нагрузки на испытываемые поверхности в 5 раз, достигая максимального значения 23,5. В рамках исследования рассматривались подшипники, оборудованные покрытиями с осевой канавкой (ширина 4 мм, глубина 0,055 мм), нанесёнными на цилиндрическую поверхность вала.

Конструкция исследуемых покрытий

Антифрикционные полимерные покрытия представляли собой композиционный гибридный материал, включающий: фторопластовые нити «Полифен» (ТУ 6-06-9-7-81), выполняющие роль внутреннего источника смазки за счёт способности к самосмазыванию; полиимидные нити «Аримид Т» (ТУ 6-06-9-11-80), придающие структуре прочность и термостойкость; фенольную смолу,

Впервые комплексно рассмотрено влияние полимерного покрытия, наличия канавки и нелинейных факторов, включая инерционные эффекты и особенности реологических свойств смазочного материала, на эксплуатационные характеристики подшипника.

Следует отметить, что эталонные расчёты, представленные в работах [6, 19], не учитывали вышеперечисленные факторы. В связи с этим, для обеспечения корректной оценки влияния введённых факторов, полученные результаты сопоставлялись с исходным эталонным расчётом.

Результаты сравнения представлены в табл. 1.

модифицированную термостойким каучуком, выполняющую функцию матричного связующего и адгезива.

Методика проведения испытаний

Экспериментальная программа включала следующие этапы:

1. Подготовку образцов: шлифовка (поверхность роликов обрабатывается до 8–9-го класса шероховатости, образцов до 6-го) и доводка рабочих поверхностей, контроль геометрических параметров с помощью профилометра, нанесение полимерного покрытия с формированием канавки.

2. Настройку параметров испытаний: задавались угловая скорость вращения вала, нормальная нагрузка, температура окружающей среды и тип смазочного материала.

3. Измерения: коэффициента трения; температуры рабочей зоны; несущей способности (по показателям давления и усилия в зазоре); износа покрытия после определённого количества циклов.

Обработка и анализ данных

Результаты экспериментальных измерений обрабатывались статистически. Для оценки точности модели проводилось сравнение с расчётными данными, полученными на основе разработанной математической модели. Отклонения между теоретическими и экспериментальными значениями коэффициента трения и несущей способности не превышали 3–5 %, что свидетельствует о высокой точности модели.

Таблица 2. Результаты исследования

№ п/п	Режим		Теоретический результат	Экспериментальное исследование
	σ , МПа	V , м/с		
1	4,7	0,3	0,0361	0,0368
2	9,4	0,3	0,0135	0,0142
3	14,1	0,3	0,0080	0,0087
4	18,8	0,3	0,0060	0,0067
5	23,5	0,3	0,0075	0,0081

Краткие итоги по эксперименту:

- подтверждена высокая степень соответствия между расчётными и экспериментальными данными;
- экспериментальные данные подтвердили достоверность предложенной модели: расхождение между расчётными и фактическими значениями по ключевым параметрам не превышало 3–5 %;
- модель успешно верифицирована в гидродинамическом режиме смазывания, типичном для реальных условий эксплуатации.

Заключение. Проведённое исследование подтвердило значимость учёта нелинейных факторов при анализе триботехнических характеристик радиальных подшипников скольжения с антифрикционными полимер-

ными покрытиями. Разработанная математическая модель позволила оценить влияние этих факторов на несущую способность и коэффициент трения, обеспечивая более точный прогноз по сравнению с традиционными методиками. Это позволило повысить точность расчётов несущей способности на 7–15 %, а коэффициента трения – на 5–13 %

Результаты верифицированы с помощью лабораторных экспериментов, выполненных в гидродинамическом режиме смазывания. Полученное совпадение расчётных и экспериментальных данных подтверждает эффективность предложенного подхода и возможность его практического применения.

Литература

1. Ларченко А.Г., Белых А.П., Филиппенко Н.Г., Баканин Д.В. Прибор и метод теплового воздействия для контроля и изучения физико-механических характеристик полимерных композиционных материалов // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 3 (51). С. 40–45. DOI: 10.18324/2077-5415-2021-3-40-45.
2. Дроздов Ю.Н., Пучков В.Н., Пономаренко А.Г. Трибологические свойства и применение антифрикционных самосмазывающихся покрытий в шарнирах и подшипниках скольжения – демпферах колебаний авиационных конструкций // Результаты фундаментальных исследований в прикладных задачах авиостроения. – М.: Наука, 2016. 511 с. С. 461–472. ISBN 978-5-9908169-6-1.
3. Кохановский В.А., Камерова Э.А. Трение полимерных покрытий в жидких смазочных средах // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 4. С. 17–20.
4. Мукутадзе М.А., Чуб Е.Г. Разработка нового математического метода моделирования модифицированной конструкции радиального подшипника скольжения // Инженерный вестник Дона. 2024. № 5(113). С. 185–194.
5. Лагунова Е.О. Расчётная модель радиального подшипника, смазываемого расплавом, в турбулентном режиме трения с учётом зависимости вязкости от давления и температуры // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22, № 7(138). С. 19–32. – DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-19-32.
6. Киришицева В.И. Моделирование методики повышения износостойкости радиального подшипника с полимерным покрытием // Инженерный вестник Дона 2022. № 10 (94). С. 229–239.
7. Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Петрова Г.Н., Мекалина И.В. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения с функциональными свойствами // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 405–419. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419.
8. Плеханов Н.Г., Федоров В.С. Влияние организации потока жидкости в роторе на эффективность центробежной очистки масел // Системы. Методы. Технологии. 2025. № 1 (65). С. 60–67. DOI: 10.18324/2077-5415-2025-1-60-67.
9. Брянский А.А., Башков О.В., Белова И.В., Башкова Т.И. Исследование развивающихся повреждений при изгибном нагружении полимерных композиционных материалов и их идентификация методом акустической эмиссии // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2022. № 2. С. 7–16. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-2-7-16.
10. Wen S.-Z., Zhong S.-D., Kan W.-Q., Zhao P.-S., He Y.-C. Experimental and theoretical investigation on the hydrochromic property of Ni(II)-containing coordination polymer with inclined 2D–3D polycatenation architecture // Journ. of Molecular Structure. 2022. Vol. 1269, P. 133753. DOI: 10.1016/j.molstruc.2022.133753.
11. Jin L., Cao W., Wang P., Song N., Din P. Interconnected MXene/Graphene network constructed by soft template for multi-performance improvement of polymer composites // Nano-Micro Letters. 2022. Vol. 14 (1), № 133. P. 1–17. DOI: 10.1007/s40820-022-00877-7.
12. Robertson B.P., Calabrese M.A. Evaporation-controlled dripping-onto-substrate (DoS) extensional rheology of viscoelastic polymer solutions // Scientific Reports. 2022. Vol. 12 (1). P. 4697. DOI: 10.1038/s41598-022-08448-x.
13. Ivanochkin P.G., Manturov D.S., Danilchenko S.A., Karpenko K.I. Study on the effect of the sealers on the steel surface layer modified by electrical discharge machining // Solid State Phenomena. 2021. Vol. 316. P. 713–719.
14. Брянский А.А., Башков О.В. Идентификация источников акустической эмиссии в полимерном композиционном материале в условиях циклического растяжения // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. № 3. С. 19–27. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-3-19-27.
15. Saha S., Adachi Y. Shielding behavior of electrokinetic properties of polystyrene latex particle by the adsorption of neutral poly (ethylene oxide) // Journ. of Colloid and Interface Science. 2022. Vol. 626. P. 930–938. DOI: 10.1016/j.jcis.2022.06.154.
16. Иваночкин П.Г., Суворова Т.В., Данильченко С.А., Новиков Е.С., Беляк О.А. Комплексное исследование полимерных композитов с матрицей на основе фенилона С-2 // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщения. 2018. № 4 (72). С. 18–25.
17. Egghe T., Ghobeira R., Morent R., Hoogenboom R., De Geyter N. Comparative study of the aging behavior of plasma activated hexamethyldisiloxane-based plasma polymers and silicone elastomer thin films // Progress in Organic Coatings. 2022. Vol. 172. P. 107091. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2022.107091.
18. Hu P., Xie R., Xie Q., Ma C., Zhang G. Simultaneous realization of antifouling, self-healing, and strong substrate adhesion via a bioinspired self-stratification strategy // Chemical Engineering Journ. 2022. Vol. 449. P. 137875. DOI: 10.1016/j.cej.2022.137875.
19. Болгова Е.А., Мукутадзе М.А., Колобов И.А., Харламов П.В. Оценка износостойкости модифицированной конструкции радиального подшипника с учётом сжимаемости // Системы. Методы. Технологии. 2025. № 1 (65). С. 15–22. DOI: 10.18324/2077-5415-2025-1-15-22.
20. Василенко В.В., Киришицева В.И., Мукутадзе М.А., Шведова В.Е. Исследование износостойкости подшипника скольжения с полимерным покрытием опорного кольца, имеющего канавку // Advanced Engineering Research

(Rostov-on-Don). 2022. Т. 22, № 4. С. 365–372. DOI: 0.23947/2687-1653-2022-22-4-365-372.

References

- Larchenko A.G., Belykh A.P., Filippenko N.G., and Bakanin D.V. Device and Method of Thermal Exposure for Monitoring and Studying the Physical and Mechanical Characteristics of Polymer Composite Materials // *Systems. Methods. Technologies*. 2021. № 3 (51). P. 40–45. DOI: 10.18324/2077-5415-2021-3-40-45.
- Drozдов Yu.N., Puchkov V.N., Ponomarenko A.G. Tribological properties and application of antifriction self-lubricating coatings in hinges and plain bearings – vibration dampers of aircraft structures // *Results of fundamental research in applied problems of aircraft engineering*. – M. : Nauka, 2016. № 511. P. 461–472. ISBN 978-5-9908169-6-1.
- Kohanovskij V.A., Kamerova E.A. Friction of polymer coatings in liquid lubricants // *Friction&Lubrication in Machines and Mechanisms*. 2014. № 4. P. 17–20.
- Mukutadze M.A., Chub E.G. Development of a New Mathematical Method for Modeling a Modified Design of a Radial Plain Bearing // *Engineering Bulletin of the Don*. 2024. № 5 (113). P. 185–194.
- Lagunova E.O. Calculation model of a radial bearing lubricated with molten grease in the turbulent friction regime, taking into account the dependence of viscosity on pressure and temperature. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2018. Vol. 22. № 7 (138). P. 19–32. – DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-19-32.
- Kirishcheva V.I. Modeling of the Technique for Increasing the Wear Resistance of a Polymer-Coated Radial Bearing. *Engineering Bulletin of the Don* 2022. № 10 (94). Pp. 229–239.
- Kondrashov S.V., Shashkeev K.A., Petrova G.N., Mekalina I.V. Polymer composite materials of structural purpose with functional properties. *Aviation materials and technologies*, 2017, no. S, P. 405–419. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419.
- Plekhanov N.G., Fedorov V.S. Influence of the organization of the fluid flow in the rotor on the efficiency of centrifugal oil purification. *Systems. Methods. Technologies*. 2025. №. 1 (65). P. 60–67. DOI: 10.18324/2077-5415-2025-1-60-67.
- Bryansky A.A., Bashkov O.V., Belova I.V., Bashkova T.I. Investigation of developing damages under bending loading of polymer composite materials and their identification by acoustic emission method. *Frontier Materials & Technologies*, 2022, no. 2. P. 7–16. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-2-7-16.
- Wen S.-Z., Zhong S.-D., Kan W.-Q., Zhao P.-S., He Y.-C. Experimental and theoretical investigation on the hydrochromic property of Ni(II)-containing coordination polymer with an inclined 2D-3D polycatenation architecture // *Journ. of Molecular Structure*. 2022. Vol. 1269. P. 133753. DOI: 10.1016/j.molstruc.2022.133753.
- Jin L., Cao W., Wang P., Song N., Din P. Interconnected MXene/Graphene network constructed by soft template for multi-performance improvement of polymer composites // *Nano-Micro Letters*. 2022. Vol. 14 (1), № 133. P. 1–17. DOI: 10.1007/s40820-022-00877-7.
- Robertson B.P., Calabrese M.A. Evaporation-controlled dripping-onto-substrate (DoS) extensional rheology of viscoelastic polymer solutions. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12 (1). P. 4697. DOI: 10.1038/s41598-022-08448-x.
- Ivanochkin P.G. Manturov D.S., Danilchenko S.A., Karpenko K.I. Study on the effect of the sealers on the steel surface layer modified by electrical discharge machining // *Solid State Phenomena*. 2021. Vol. 316. P. 713–719.
- Bryanskij A.A., Bashkov O.V. Identification of acoustic emission sources in a polymer composite material under conditions of cyclic stretching // *Science Vector of Togliatti State University*. 2021. № 3. P. 19–27. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-3-19-27.
- Saha S., Adachi Y. Shielding behavior of electrokinetic properties of polystyrene latex particle by the adsorption of neutral poly (ethylene oxide) // *Journ. of Colloid and Interface Science*. 2022. Vol. 626. P. 930–938. DOI: 10.1016/j.jcis.2022.06.154.
- Ivanochkin P.G., Suvorova T.V., Danilchenko S.A., Novikov E.S., Belyak O.A. Comprehensive study of polymer composites with a matrix based on phenylene C-2. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya*, 2018, no. 4 (72), P. 18–25.
- Egghe T., Ghobeira R., Morent R., Hoogenboom R., De Geyter N. Comparative study of the aging behavior of plasma activated hexamethyldisiloxane-based plasma polymers and silicone elastomer thin films. *Progress in Organic Coatings*, 2022, vol. 172, P. 107091. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2022.107091.
- Hu P., Xie R., Xie Q., Ma C., Zhang G. Simultaneous realization of antifouling, self-healing, and strong substrate adhesion via a bioinspired self-stratification strategy // *Chemical Engineering Journ.* 2022. Vol. 449. P. 137875. DOI: 10.1016/j.cej.2022.137875.
- Bolgov E.A., Mukutadze M.A., Kolobov I.A., Kharlamov P.V. Assessment of the Wear Resistance of a Modified Radial Bearing Design Taking into Account Compressibility // *Systems. Methods. Technologies*. 2025. No. 1 (65). P. 15–22. DOI: 10.18324/2077-5415-2025-1-15-22.
- Vasilenko V.V., Kirishchieva V.I., Mukutadze M.A., Shvedova V.E. Study of the wear resistance of a sliding bearing with a polymer coating of a support ring having a groove // *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2022. Vol. 22, № 4. P. 365-372. DOI: 0.23947/2687-1653-2022-22-4-365-37.